

# 表面粗糙度激光散射检测的多波长光纤传感器

朱南南, 张 骏

(烟台大学 光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

**摘 要:** 材料表面的散射特性和表面粗糙度对产品的性能有十分重要的影响, 基于激光散射原理设计了用于检测表面粗糙度和表面散射特性的多波长光纤传感器。光纤传感器的探头采用特殊的几何设计, 用 650 nm、1 310 nm 和 1 550 nm 激光作为光源, 选择 2 mm 的工作距离作为最佳测量距离, 对不同表面粗糙度的样品进行了测试和分析。实验结果表明: 同一波长下, 随着表面粗糙度的增大, 以外磨样品为反射面测得的反射强度减小; 同一粗糙度下, 入射波长越长, 反射强度越大。多波长光纤传感器可以精确地测量表面粗糙度, 并能有效地减小系统误差。系统误差分析得到传感器的相对误差范围大约为 3.56%~7.43%。

**关键词:** 表面粗糙度; 多波长光纤传感器; 激光散射; 在线测量

**中图分类号:** TP212.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0522003

## Multi-wavelength fiber sensor for measuring surface roughness based on laser scattering

Zhu Nannan, Zhang Jun

(Institute Opto-Electronic Information of Science & Technology, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract:** Scattering characteristics and surface roughness on the surface of the materials make a very important influence on the performance of the product. The multi-wavelength fiber sensor for measuring surface roughness and surface scattering characteristics based on laser scattering was investigated. The special geometric design was used by the probe of fiber optic sensor, specimens with different surface roughness were analyzed by using 650 nm, 1 310 nm and 1 550 nm laser as the light source, respectively. The working distance of 2 mm was chosen as the optimum measurement distance. The experimental results indicate that under the same wavelength, the reflection intensity measured from the reflective surface of grinding samples decrease with the increase of surface roughness. Under the same roughness, the incident wavelength is longer, the reflection intensity is bigger. The multi-wavelength fiber sensor can accurately measure surface roughness, and can effectively reduce the system error. The range of relative error of fiber sensor by analyzing system error is about 3.56%~7.43%.

**Key words:** surface roughness; multi-wavelength fiber sensor; laser scattering; on-line measurement

收稿日期: 2015-09-13; 修订日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60277023); 山东省自然科学基金(ZR2011FM007); 烟台大学研究生科技创新基金(01074)

作者简介: 朱南南(1988-), 女, 硕士生, 主要从事光传输特性方面的研究。Email: nannan09051988@163.com

导师简介: 张骏(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电信息获取与处理方面的研究。Email: jzhang@ytu.edu.cn

## 0 引言

在大型光学工程和激光应用中,材料的表面散射特性和表面粗糙度对于研究光学系统和加工产品的性能具有十分重要的意义。国内外许多学者也已在在这方面做了大量的研究<sup>[1-9]</sup>,从早期的定性测量发展到了如今的定量测量,从原先的接触式测量法到现在的非接触式测量法<sup>[7-8]</sup>,分析了多种材料表面的散射特性。对于表面粗糙度的测量,接触式测量法会损伤材料表面的质量和性能,导致测量不准确;而非接触式测量法避免了材料表面的损伤,减少了误差。

随着激光技术的发展,非接触式测量法得到了越来越广泛的发展,其中非接触式的光学测量方法倍受关注,例如基于激光散射原理的光纤传感器<sup>[1-6]</sup>,散射法<sup>[8-10]</sup>,平均散射强度(mean scattered intensity, MSI)分析法<sup>[11]</sup>,散斑分析法<sup>[12-15]</sup>等。由于在大型光学工程中对光学元件表面粗糙度测量精度的要求高<sup>[16]</sup>,采用接触式测量法会对待测样品产生严重的误差,测量不准确;文中采用了非接触式的光学测量法来检测材料表面的散射特性以及测量表面粗糙度值。当光源照射到材料表面时,光的散射特性可以通过镜向反射强度和散射强度来描述<sup>[17-18]</sup>。在实验系统中采集不同粗糙度表面的散射强度值,利用测量原理中粗糙表面的光散射强度和粗糙度的关系可以预测粗糙表面的粗糙度值。在复杂环境中,空气中的悬浮颗粒<sup>[19]</sup>将沉积在材料表面污染材料,并增加材料表面的散射,利用这种非接触式的光学测量法可以有效地检测颗粒污染表面的散射特性。

利用光纤传感技术,文中设计了基于激光散射<sup>[20-21]</sup>的测量表面散射特性和表面粗糙度的光纤测量仪,称为多波长光纤传感器(multi-wavelength fiber sensor, MWFS),利用从两个不同波长下测得的粗糙表面的光散射强度比值可以获得表面粗糙度值。实验装置由激光器、耦合装置、传感器、探测器、数据采集系统五部分组成。通过这个装置可以有效地测量粗糙表面的散射特性和表面粗糙度值。光纤传感器具有测量装置简单、数据处理方便、非接触在线测量的优点。由于这些优点,该方法也适于分析污染颗粒对材料表面的散射特性。

## 1 表面粗糙度的测量原理

假设粗糙表面微观不平度的随机分布符合高斯分布,忽略表面的吸收,通过测量粗糙表面的反射强度可以得到表面散射特性和表面粗糙度。在研究中,采用光纤传感技术研究表面粗糙度和粗糙表面的主要特性。如图 1 所示设计的光纤束端面结构,其由中间的发送光纤(小芯径的单模光纤)和围绕它的按照等角度间隔分布的紧密排列的六根接收光纤(多模的大芯径特殊光纤)组成,且不管发送光纤还是接收光纤都选择工作在 1 550 nm 波长的石英光纤。光纤束的强度调制函数可以认为是六个单光纤对的强度调制函数之和。

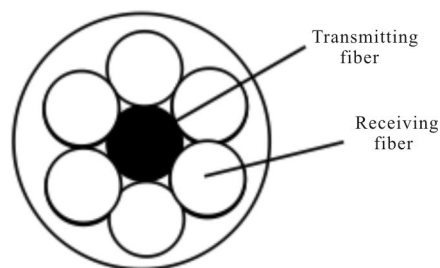


图 1 光纤束端面结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber bundle end face

单光纤对的有效受光面积<sup>[4]</sup>为:

$$S_r = \begin{cases} 0 & d \leq d_0 \\ \varphi q^2 + \arcsin\left(\frac{q \sin \varphi}{r_2}\right) \cdot r_2^2 - pq \sin \varphi & d_0 < d \leq d_1 \\ \varphi q^2 + \left[\pi - \arcsin\left(\frac{q \sin \varphi}{r_2}\right)\right] \cdot r_2^2 - pq \sin \varphi & d_0 < d < d_2 \\ \pi r_2^2 & d \geq d_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{记 } d_0 = \frac{p-r_1-r_2}{2 \tan \theta_{N1}}, d_1 = \frac{\sqrt{p^2+r_2^2}-r_1}{2 \tan \theta_{N1}}, d_2 = \frac{p-r_1+r_2}{2 \tan \theta_{N1}}, \varphi = \arccos\left(\frac{p^2+q^2-r_2^2}{2pq}\right).$$

式中:  $r_1$ 、 $r_2$  分别为发送光纤、接收光纤的纤芯半径;  $a$  为两光纤间距;  $d$  为光纤探头与被测样件表面之间的距离;  $p$  为发送光纤和接收光纤的轴间距,  $p=r_1+a+r_2$ ;  $q$  为反射光在光纤端面处的光斑半径  $q=r_1+2d \tan \theta_{N1}$ ,  $\theta_{N1} = \arcsin NA_1$ ,  $NA_1$  为发送光纤的数值孔径。

传感器的发送光纤是单模光纤，在单模光纤中光的分布为高斯分布，故认为其出射光强的分布也符合高斯分布，如图 2 所示，则出射光场点 $(\rho, z)$ 处的光强为：

$$I(\rho, z) = \frac{P_t}{\pi q^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(z)}\right] \quad (2)$$

式中： $P_t$ 为发送光纤发出的光功率； $q(z)$ 为出射光束在距离 $z$ 处的光斑直径； $\rho$ 为观察点与光斑中心的距离。

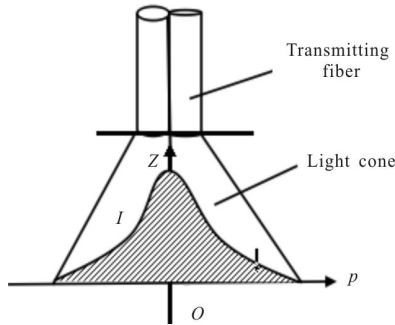


图 2 发送光纤出射光强高斯分布示意图

Fig.2 Gaussian distribution of intensity of transmitting fiber

假设反射面为理想镜面，在距离反射面 $d$ 处接收光纤端面的反射光强度可看作距离 $2d$ 处的发送光纤发出的光强度，即

$$I_r(\rho, d) = I(\rho, 2d) = \frac{P_t}{\pi q^2(2d)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] \quad (3)$$

则接收光纤所能接收的光功率为：

$$P_r(\rho, d) = \int_s I_r(\rho, d) ds = \int_s \frac{P_t}{\pi q^2(2d)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] ds \quad (4)$$

假设接收光纤中心处的光强为光纤端面处的平均光强，则

$$P_r(p, d) = \int_s I_r(p, d) ds = \int_s \frac{P_t}{\pi q^2(2d)} \exp\left[-\frac{p^2}{q^2(2d)}\right] ds \quad (5)$$

由公式(1)、(5)可推导出单光纤对的光强调制函数为：

$$M = \begin{cases} 0 & d \leq d_0 \\ \int_b^a \frac{1}{\pi q^2(2d)} \exp\left[-\frac{p^2}{q^2(2d)}\right] \cdot & d_0 < d < d_2 \\ 2\rho \arccos\left[\frac{\rho^2 + (p-r_2)^2 + 2r_2(p-r_2)}{2r_2(p-r_2+\rho)}\right] d\rho & \\ \frac{r_2^2}{q(2d)^2} \exp\left[-\frac{p^2}{q^2(2d)}\right] & d \geq d_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $b=p-r_2, c=r_1+2d \tan(\theta_{N1})$ 。

由公式(6)可以看出，光强调制函数 $M$ 与光纤对的结构参数、光纤性能参数以及距离 $d$ 有关，当光纤对的光纤轴间距及光纤选定后， $M$ 主要取决于距离 $d$ 。在 $NA_2 \geq NA_1$  ( $NA_2$ 为接收光纤的数值孔径)的条件下，将公式(6)简记为：

$$M_{pair} = f(r_1, r_2, NA_1, p, d) \quad (7)$$

则光纤束的光强调制函数的表达式为：

$$M_s = 6M_{pair}(r_1, r_2, NA_1, p, d) \quad (8)$$

根据 Beckmann 散射模型，粗糙表面的平均散射光功率<sup>[4]</sup>可表示为：

$$P(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) = \rho_s^2 \exp(-g(\theta_i, \theta_s)) + D(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) \quad (9)$$

式中： $\rho_s$ 为散射系数， $|\rho_s| \leq 1$ ； $D$ 为漫散射引起的不相干分量； $g(\theta_i, \theta_s)$ 因子<sup>[8]</sup>为控制镜向分量的相对大小，表达式为：

$$g(\theta_i, \theta_s) = \sigma^2 v_z^2(\theta_i, \theta_s) = \left[\frac{2\pi\sigma}{\lambda}(\cos\theta_i + \cos\theta_s)\right]^2 \quad (10)$$

散射系数<sup>[8]</sup>为：

$$\langle \rho_s \rangle = \rho_0 \exp\left[-\frac{2\pi^2\sigma^2}{\lambda^2}(\cos\theta_i + \cos\theta_s)^2\right] \quad (11)$$

式中： $\rho_0$ 为光滑表面的散射系数； $\theta_i$ 和 $\theta_s$ 分别为入射角和散射角； $\sigma$ 为轮廓均方根偏差； $\lambda$ 为入射光的波长。

当 $\theta_i = \theta_s$ 时，镜向散射系数和镜向散射平均功率分别为：

$$\langle \rho_{spec} \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\cos\theta_i\right)^2\right] \quad (12)$$

$$P_s = \rho_s^2 \exp(-g(\theta_i, \theta_s)) \quad (13)$$

当一定波长的光垂直入射到粗糙表面时， $\theta_i = \theta_s = 0$ ，根据公式(10)、(12)及(13)，可得镜向散射平均功率的表达式为：

$$\langle P_s \rangle = \exp\left[-2\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2\right] \quad (14)$$

光纤表面粗糙度传感器的光强输出为：

$$I = I_0 \cdot P_s \cdot M_s = I_0 \cdot M_s \cdot \exp\left[-2\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2\right] \quad (15)$$

由公式(6)、(15)可以得到反射光强和表面粗糙度以及工作距离之间的关系。由于非系统误差(记为 $\beta(\lambda)$ )严重影响了光纤传感系统的精密测量，采用多波长可以有效地减小非系统误差。设双波长分别为

$\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 上述干扰因素对于双光源的影响结果分别记为  $\beta(\lambda_1)$  和  $\beta(\lambda_2)$ , 则方程(15)可以改为:

$$I_{\lambda_1} = I_{o-\lambda_1} \cdot M_S \cdot \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_1) \right] \quad (16)$$

$$I_{\lambda_2} = I_{o-\lambda_2} \cdot M_S \cdot \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_2) \right] \quad (17)$$

由于使用相同的光纤路径, 可以认为  $\beta(\lambda)$  对双波长的影响相等, 即  $\beta(\lambda_1) = \beta(\lambda_2)$ 。双波长的反射光强比值为:

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{I_{o-\lambda_1} \cdot \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_1) \right]}{I_{o-\lambda_2} \cdot \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_2) \right]} = \frac{I_{o-\lambda_1}}{I_{o-\lambda_2}} \cdot \exp \left[ 2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} \sigma \right)^2 - 2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma \right)^2 \right] \quad (18)$$

式中:  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为测量中的工作波长。从方程 (18) 中得到表面轮廓均方根偏差  $\sigma$  的表达式为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2}{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \ln \left[ \frac{I_{\lambda_1} \cdot I_{o-\lambda_2}}{I_{\lambda_2} \cdot I_{o-\lambda_1}} \right] \quad (19)$$

式中:  $I_{\lambda_1}$  和  $I_{\lambda_2}$  分别是两波长下的反射强度,  $I_{o-\lambda_1}$  和  $I_{o-\lambda_2}$  分别是两波长下的入射强度。表面轮廓算术平均偏差  $R_a$  和表面轮廓均方根偏差  $\sigma$  的关系为:

$$R_a = \frac{4}{5} \sigma \quad (20)$$

## 2 实验装置

表面粗糙度的测量系统如图 3 所示, 系统由激光器、耦合装置、传感器、探测器、数据采集系统五部分组成。实验中采用三种不同波长的激光器作为入射光源, 其中波长 650 nm 和 1 310 nm 作为一组光源, 波长 650 nm 和 1 550 nm 作为另一组光源。

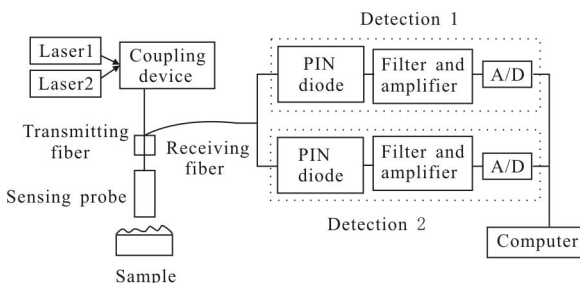


图 3 改进的表面粗糙度检测光纤传感器的结构模型

Fig.3 Structure model of improved fiber optic sensor for measuring surface roughness

两种不同波长的激光器(1,2)发射出光, 经光纤耦合器进入发送光纤, 该光纤出射的光垂直入射到被测样品的表面, 光线经被测表面相互作用之后, 返回的反射光携带有被测表面的轮廓信息被接收光纤接收, 接收光纤中的光信号再分成两个支路分别进入探测器一(光纤耦合硅探测器, 型号: DET02AFC, 波长范围为 400~1 100 nm) 与探测器二(光纤耦合 InGaAs 探测器, 型号: DET01CFC, 波长范围为 800~1 700 nm) 中, 由于探测器只允许规定波长范围内的光线通过, 所以利用两个探测器可以将两个不同波长的光源分开; 然后经探测器将光信号转换为电压信号, 再对电信号进行滤波放大预处理, 经 A/D 转换后进入计算机, 以电压信号来显示被测样品表面的散射光强。

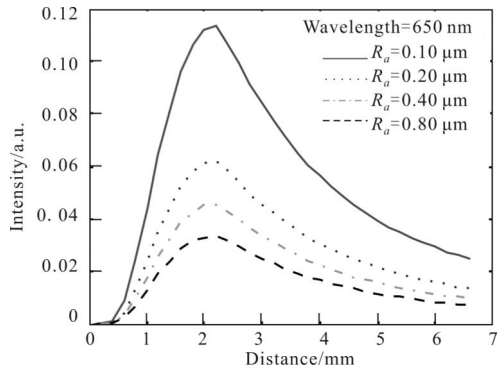
## 3 表面粗糙度的理论模拟与实验

为了研究表面粗糙度对光散射特性的影响, 选用哈尔滨市精密样板工具厂生产的外磨标准金属样品(符合 GB6060.2-85 标准, 不同表面粗糙度  $R_a$  为 0.10  $\mu\text{m}$ , 0.20  $\mu\text{m}$ , 0.40  $\mu\text{m}$ , 0.80  $\mu\text{m}$ ) 作为测试样本进行检测, 并与相关参数下理论模拟的计算结果进行比对分析。

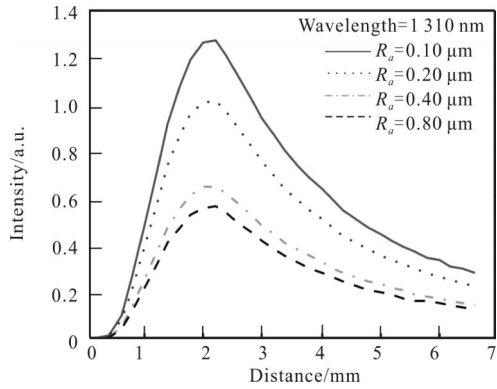
### 3.1 粗糙表面的特征提取

当两组入射光源的波长为 650 nm 和 1 310 nm, 650 nm 和 1 550 nm 时, 三种不同波长下不同粗糙度样品的反射强度随着工作距离变化的模拟和实验结果如图 4 和图 5 所示。从两个图中可以看出理论曲线与实验曲线的趋势基本一致, 图 4 中不同波长下不同粗糙度的模拟曲线比图 5 中的实验曲线平滑, 且各曲线之间没有交叉点。从图中还可以看出: 同一波长下, 随着表面粗糙度的增大, 以外磨样品为反射面测得的反射强度减小; 同一波长、粗糙度下, 随着工作距离的增加, 反射强度先增大后减小, 且在某一距离处反射强度有最大值; 同一粗糙度下, 入射波长越长, 反射强度越大; 多波长下测得的反射强度的变化比单波长下测得的反射强度的变化更明显; 不同入射波长(650 nm、1 310 nm、1 550 nm)下, 不同粗糙度强度曲线的衰减率分别约为 0.905%、12.1%、36.5%。所有曲线的趋势基本上相同, 且特性曲线的前坡线性范围较小, 但灵敏度较高。光反射强度在峰值区对

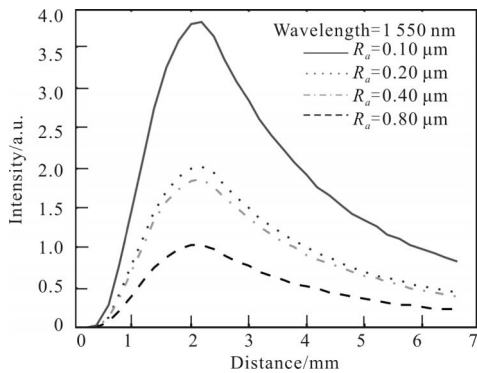
表面粗糙度的变化最敏感,所以利用峰值区的反射强度可以计算表面粗糙度。实验中选择 2 mm 的工作距离作为最佳测量距离,在这个距离处测得的反射强度可以计算得到表面粗糙度值。



(a)  $\lambda=650$  nm



(b)  $\lambda=1310$  nm



(c)  $\lambda=1550$  nm

图 4 不同波长下不同粗糙度 ( $R_a=0.10 \mu\text{m}$ ,  $0.20 \mu\text{m}$ ,  $0.40 \mu\text{m}$ ,  $0.80 \mu\text{m}$ ) 样品的反射强度随着工作距离变化的模拟结果

Fig.4 Simulated results on reflected intensity of grinding specimens ( $R_a=0.10 \mu\text{m}$ ,  $0.20 \mu\text{m}$ ,  $0.40 \mu\text{m}$ ,  $0.80 \mu\text{m}$ ) varying as working distance under the different wavelengths

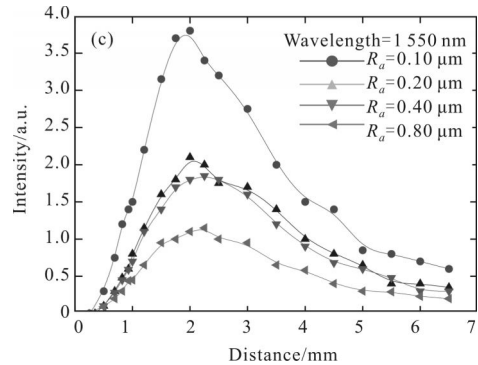
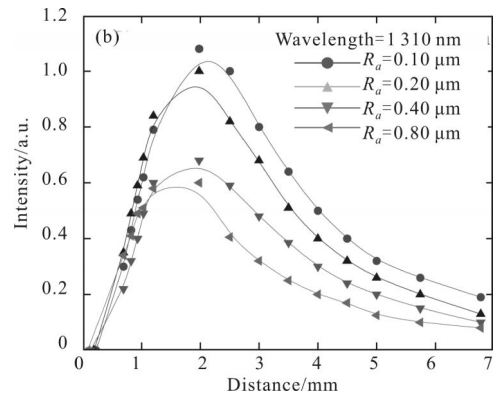
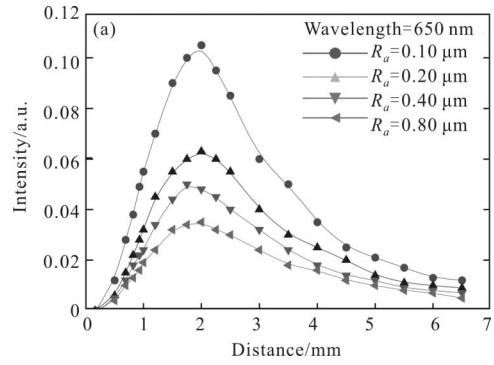


图 5 不同波长下不同粗糙度 ( $R_a=0.10 \mu\text{m}$ ,  $0.20 \mu\text{m}$ ,  $0.40 \mu\text{m}$ ,  $0.80 \mu\text{m}$ ) 样品的反射强度随着工作距离变化的实验结果

Fig.5 Experimental results on reflected intensity of grinding specimens ( $R_a=0.10 \mu\text{m}$ ,  $0.20 \mu\text{m}$ ,  $0.40 \mu\text{m}$ ,  $0.80 \mu\text{m}$ ) varying as the working distance under the different wavelengths

### 3.2 表面粗糙度的测量及误差分析

三种不同波长下不同粗糙度样品的理论数据与实验数据的差值如图 6 所示,从图中可以得到各个波长下所得到的实验数据与理论结果之间的误差,从而可以得到 2 mm 工作距离处反射强度的相对误差,进而可以计算得到双波长下测量表面粗糙度的

相对误差。当入射波长为 650 nm 时,测量不同粗糙度样品 ( $R_a=0.10 \mu\text{m}, 0.20 \mu\text{m}, 0.40 \mu\text{m}, 0.80 \mu\text{m}$ ) 传感器的相对误差分别为 4.98%、4.30%、7.87%、6.38%;而入射波长为 1310 nm 时,传感器的相对误差分别为 12.44%、1.31%、7.51%、8.46%;入射波长为 1550 nm 时,传感器的相对误差分别为 0.804%、5.12%、1.70%、6.63%;从上述分析中可以计算得到多波长光纤传感器测量表面粗糙度的相对误差范围大约为 3.56%~7.43%,进一步可以得到传感器的平均相对误差为 5.625%。

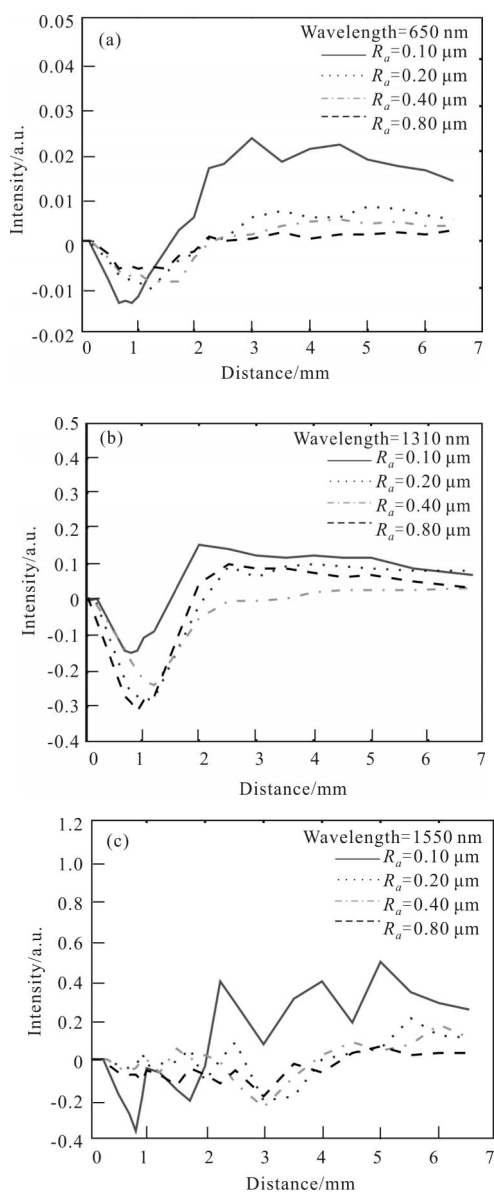


图 6 不同波长下不同粗糙度样品的误差曲线

Fig.6 Error curves of grinding specimens with different roughness under different wavelengths

## 4 结论

非接触式的光学测量法对于测量粗糙表面的散射特性和表面粗糙度具有十分重要的研究意义。文中基于激光散射原理提出了一种在线测量表面粗糙度的方法,通过测量表面反射强度的比值可以得到表面粗糙度值。利用已知粗糙度的样品作为测试样本,研究粗糙表面的散射特性以及系统的测量误差。结果表明同一波长下,随着表面粗糙度的增大,以外磨样品为反射面测得的反射强度减小;同一粗糙度下,入射波长越长,反射强度越大;多波长下测得的反射强度的变化比单波长下测得的反射强度的变化更明显,这里选取峰值区的强度值来计算表面粗糙度值。该系统在测量中不仅可以消除非系统误差,还能减小系统误差,提高了测量的准确率。计算得到系统的相对误差范围大约为 3.56%~7.43%。

## 参考文献:

- [1] Feng Mingshen, Sui Chenghua. Study on two wavelength fiber sensor for measuring surface roughness [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21(6): 873-878. (in Chinese)  
丰明坤,隋成华.用于表面粗糙度检测的双波长光纤传感器研究[J].量子电子学报,2004,21(6):873-878.
- [2] Xu Jianqiang, Jiang Chi, Zhang Hui. et al. Study on fiber sensor for measuring surface roughness [J]. *Metrology Journal*, 2002, 23(4): 280-281. (in Chinese)  
徐建强,江驰,张惠,等.检测表面粗糙度的光纤传感器研究[J].计量学报,2002,23(4):280-281.
- [3] Li Yafei. Study on a new reflective optical fiber sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(10): 1097-1099. (in Chinese)  
李亚非.一种反射式光纤传感器的研究[J].仪器仪表学报,2005,26(10):1097-1099.
- [4] Xu Xiaomei. Inner surface roughness measurement of holes based on reflective intensity modulation fiber optic Sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)  
徐晓梅.反射式强度调制型光纤传感孔内表面粗糙度检测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [5] Wang Huaping, Zhou Zhi, Wang Qian, et al. Strain transfer errors of optical fiber sensors Embedded in asphalt pavement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1499-1507. (in Chinese)

- 王花平, 周智, 王倩, 等. 光纤传感器埋入沥青路面基体的应变传递误差 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1499-1507.
- [6] Zhang Ping, Zhang Xiaodong, Dong Xiaoni. Output characteristics of sensor with two-circle coaxial optical fiber in lubricating oil medium [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 439-446. (in Chinese)  
张平, 张小栋, 董晓妮. 双圈同轴光纤传感器在润滑油介质中的输出特性 [J]. 中国光学, 2015, 8(3): 439-446.
- [7] Liu Ying, Lang Zhiguo, Tang Wenyan. Development of measurement system about light-section microscope for surface roughness [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 775-779. (in Chinese)  
刘颖, 朗治国, 唐文彦. 表面粗糙度光切显微镜测量系统的研制 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 775-779.
- [8] Guo Ruipeng. Theoretical and experimental investigation of in-process measurement of surface characteristic parameter based on laser scattering [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2011. (in Chinese)  
郭瑞鹏. 基于激光散射的在线检测表面特性参数的理论分析和实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [9] Li Lijuan. Research on applying laser scattering characteristic of object to measure surface microcosmic profile precision of steel plate [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)  
李丽娟. 目标激光散射特性在钢板表面微观轮廓精度测量中的应用研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2005.
- [10] Shi Zhenhua, Lin Guanyu, Wang Shurong, et al. Numerical analysis of small particle measurement based on the theory of laser Scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2189-2194. (in Chinese)  
石振华, 林冠宇, 王淑荣, 等. 基于激光散射理论的微小颗粒测量的数值分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2189-2194.
- [11] Gale M F Ruiz, Hogert E N. Apparent and real roughness [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(8): 947-952.
- [12] Lorenzo Basano, Stefano Leporatti, Pasquale Ottonello, et al. Measurements of surface roughness: use of a CCD camera to correlate doubly scattered speckle patterns [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(31): 7286-7290.
- [13] Peter Lehmann. Surface-roughness measurement based on the intensity correlation function of scattered light under speckle-pattern illumination [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(7): 1144-1152.
- [14] Wang Yonghong, Li Junrui, Sun Jianfei, et al. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 389-395. (in Chinese)  
王永红, 李骏睿, 孙建飞, 等. 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理 [J]. 中国光学, 2014, 7(3): 389-395.
- [15] Kong Ping, Yang Hui, Lin Weimin, et al. Measurement of particle sizes by contrast of dynamic laser speckle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2633-2638. (in Chinese)  
孔平, 杨晖, 林伟民, 等. 动态散斑对比度颗粒测量法 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2633-2638.
- [16] Fu Huaiyang, Zhou Sizhong, Jiang Kai, et al. Effects of mirror surface roughness on encircled energy for far ultraviolet telescopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2562-2567. (in Chinese)  
付怀洋, 周泗忠, 姜凯, 等. 镜面粗糙度对远紫外望远镜能量集中度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2562-2567.
- [17] Heng Zhao, Hua Dengxin. Modifications to Beckmann-Kirchhoff model for random rough surfaces with non-paraxial angles [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(3): 285-289.
- [18] Stover J C, Serati S A, Cillespie C H. Calculation of surface statistics from light scatter [J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(4): 406-412.
- [19] Xiao Jing, Zhang Bin. Influence of the optical components contamination on the signal to noise ratio in infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1010-1016. (in Chinese)  
肖静, 张彬. 光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1010-1016.
- [20] Harvey J E, Krywonos A, Bogunovic D. Nonparaxial scalar treatment of sinusoidal phase gratings [J]. *Journal of OSA-A*, 2006, 23(4): 858-865.
- [21] Sven S, Angela D, Luisa C, et al. Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9820-9835.